

УДК 504.064.45

Белоусова К.О., студент ХНм-251
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
Belousova K.O, student HNm-251
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

**ОТХОДЫ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ИСТОЧНИК
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ****COAL INDUSTRY WASTE AS A SOURCE OF RARE EARTH ELEMENTS**

Редкоземельные элементы (РЗЭ) стали критически важными материалами и движущей силой технологического прогресса в быстро развивающемся современном мире. Благодаря своим уникальным свойствам они незаменимы практически во всех областях деятельности человека – от оборонной, энергетической и электронной промышленности до автомобиле- и авиастроения.

Растущий спрос на ценные элементы обусловлен двумя ключевыми тенденциями. Во-первых, это стремительное развитие и растущее потребление электротехнического и электронного оборудования (от смартфонов и компьютеров до медицинской техники). Во-вторых, переход от традиционных источников энергии к альтернативной «зеленой» энергетике: солнечные батареи, электромобили, ветряные турбины, где РЗЭ играют ключевую роль [1-3].

С 1990 года Китай закрепил за собой статус ведущего производителя в редкоземельной индустрии, который сохраняется и сегодня. На его долю приходится свыше 85% выпуска РЗЭ, что вынуждает другие страны мира зависеть от китайского импорта. Согласно данным Геологической службы США (USGS) за 2022 год, подтвержденные резервы оксидов РЗЭ в Китае оцениваются в 44 млн т, что более чем в два раза превышает российские запасы (21 млн. т). При этом объем добычи в Китае демонстрирует значительный рост: в 2022 году он достиг 210 тыс. т (в пересчете на Ln_2O_3) – это на 25 % выше показателя 2021 (168 тыс. т). Уровень добычи в России остается существенно более низким и стабильным, составив 2,6 тыс. т как в 2021, так и в 2022 году. Доминирование Китая на рынке критически важных полезных ископаемых подчеркивается в опубликованном отчете USGS за 2023 год. Согласно которому, из 50 элементов, признанных критически важными (включая 14 лантаноидов), 30 добываются на территории Китая [4-6].

Экспортные ограничения, введенные Китаем в 2010-2011 годах, наглядно продемонстрировали уязвимость мировой экономики на редкоземельную продукцию. Это стало мощным стимулом для многих стран мира,

включая Россию, активизировать научные и технологические исследования на разработку эффективных методов получения РЗЭ как из первичных источников, так и из вторичного сырья, таких как отвалы горнорудного производства, отходов углеобогащения, золошлаковых отходов, с целью обеспечения собственной сырьевой безопасности [7-8].

РЗЭ характеризуются сходными химическими свойствами, что обуславливает их классификацию на две основные группы по растворимости в двойных солях: легкие РЗЭ, или цериевая подгруппа (от лантана до европия), и тяжелые РЗЭ, известные как иттриевая подгруппа (от гадолиния до лютеция включительно). В природных условиях РЗЭ встречаются преимущественно в форме трёхвалентных катионов в составе карбонатных, оксидных, фосфатных и силикатных минералов. Из приблизительно 200 известных редкоземельных минералов, содержащих свыше 0,01% РЗЭ, промышленное значение имеют лишь немногие [4, 9].

Процесс добычи полезных ископаемых сопровождается извлечением значительного количества пустой породы (балласта), не имеющей промышленной ценности, что приводит к существенному росту энергозатрат и экономических издержек предприятий.

В Российской Федерации экологическая обстановка отличается высоким уровнем антропогенной нагрузки и серьезными негативными последствиями для окружающей среды. Значительная часть извлекаемых природных ресурсов используется нерационально, о чем свидетельствуют сравнительные показатели ресурсоемкости внутреннего валового продукта (ВВП): в России этот показатель вдвое превышает значения США и вчетверо – страны Западной Европы. Аналогичная ситуация наблюдается с энергоемкостью, где российские показатели вдвое выше американских и втрое – показателей Западной Европы и Японии. Таким образом, для производства единицы продукции в России привлекается в 2-4 раза больше природных ресурсов, а их неиспользуемая часть поступает в окружающую среду в виде твердых, жидких и газообразных отходов. Так, например, в угледобывающей отрасли при открытой разработке месторождений на 1 тонну добытого угля приходится 4-5 тонн отходов, которые складывают в отвалы [10-11].

Кемеровская область, являющаяся ключевым угледобывающим регионом России, сталкивающаяся с серьезными экологическими проблемами, связанными с отходами, образующиеся при добыче полезных ископаемых. Так в 2020 году в регионе было образовано 2,93 млрд тонн отходов, из которых 2,76 млрд тонн (94,2%) пришлось на добычу полезных ископаемых. Анализ структуры отходов показывает абсолютное преобладание отходов V класса опасности (от 99,83 до 99,95%), основным источником которых является угледобыча – вскрышные и вмещающие породы [12].

Одним из направлений в снижении экологического и экономического ущерба от отходов угольной промышленности является разработка технологий извлечения РЗЭ. Утилизация отвалов с попутным получением ценных

компонентов позволяет не только уменьшить объемы накопленных пород, но и создать новые источники стратегически важного сырья.

В настоящее время изучаются возможности переработки отходов обогащения угля, образующиеся на АО ЦОФ «Березовская», в частности породы тяжёлосредной сепарации – БФ-4 (класс +13 мм) и продуктов гидравлической отсадки – БФ-5 (класс 0,5–13 мм) [13].

В публикации [8] представлены условия и результаты кучного выщелачивания отходов углеобогащения серноокислотными растворами. На модельных образцах (гранулы отходов БФ-4 и БФ-5 с содержанием оксида лантана 0,1%) изучено влияние концентрации серной кислоты, скорости ее подачи и соотношения фаз на степень перехода лантана в фильтрат. Экспериментальные данные показали, что эффективность извлечения возрастает с увеличением объема, концентрации кислоты и скорости ее подачи. При этом максимальный выход лантана наблюдается через 6–9 часов после начала процесса.

Параллельно исследуются методы получения редкоземельного концентрата из серноокислых фильтратов. В частности, в исследовании рассматриваются условия применения щавелевой кислоты для селективного осаждения РЗЭ при минимальном соосаждении примесей алюминия и железа.

Таким образом, разработка технологий извлечения РЗЭ из отходов угольной промышленности позволяет одновременно решить две задачи: снизить экологическую нагрузку от накопленных отвалов и создать новый источник ценных элементов, необходимых для высокотехнологичных отраслей и «зеленой» энергетики. Проведенные исследования подтверждают принципиальную возможность и эффективность извлечения РЗЭ из отходов углеобогащения методами выщелачивания с последующим осаждением, что открывает путь к обеспечению сырьевой безопасности и развитию экономики.

Список литературы

1. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minori Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.
2. Ross K Taggart, James C Hower, Gary S Dwyer, Heileen Hsu-Kim. Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.-Based Coal Combustion Fly Ashes. *Environmental Science and Technology*. 2016; 50(11). (In Eng.) doi: 10.1021/acs.est.6b00085.
3. Ata Akcil, Ceren Erust, Chandra Sekhar Gahan, Mehmet Ozgun. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants – A review. *Waste Management*. 2015; 45(Urban Mining):258-271. (In Eng.) doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.017.

4. Ariuntuya Battengel, Altansukh Batnasan, Ariunbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. Hydrometallurgy. 2018; 179. (In Eng.) doi: 10.1016/j.hydromet.2018.05.024.

5. Rare Earths Statistics and Information [Electronic resource] // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey: [Website]. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения: 01.10.2025).

6. U.S. Geological Survey, 2023, Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017.

7. Nabeel Mancheri, Benjamin Sprecher, Gwendolyn Bailey, Jianping Ge. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. Resources Conservation and Recycling. 2018; 142(march 2019):101-112. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017

8. Белоусова, К. О. Подбор оптимальных условий для извлечения лантана из отходов АО ЦОФ «Березовская» / К. О. Белоусова, Н. А. Золотухина, Ю. А. Винидиктова // Сборник материалов I Международной VII Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». Кемерово : КузГТУ, 2024 . С. 1-7.

9. Adam Jordens, Ying Ping Cheng, Kristian Edmund Waters. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. Minerals Engineering. 2013; 41:97–114. (In Eng.) doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.017

10. Белоусова, К.О. Проблемы отходов углепереработки и пути их решения / К.О. Белоусова, А.А. Мальцева // II Всероссийская научно-практическая конференция студентов и школьников «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2024. – С. 1-5.

11. Абдрахимов, В.З. Исследование регрессивным методом анализа влияния шлака от выплавки ферросплавов на физико-механические показатели керамического кирпича / В. З. Абдрахимов, Л. Е. Хабибуллина, Д. В. Абдрахимов // Эксперт: теория и практика. — 2020. — № 6. — С. 48-59.

12. Михайлов, В.Г. Совершенствование механизмов обеспечения геоэкологической безопасности в области обращения с отходами / В. Г. Михайлов, А. А. Хорешок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2022. — № 3. — С. 40-54

13. Черкасова, Т. Г. Перколяционное выщелачивание гранул образцов АО ЦОФ «Березовская» 0,05 М раствором серной кислоты / Т.Г. Черкасова, Н.А. Золотухина, Д.А. Баранцев и др. // Уголь. 2024;(8):71-75. doi: 10.18796/0041-5790-2024-8-71-75.

14. Chi R., Xu Z. A solution chemistry approach to the study of rare earth element precipitation by oxalic acid. Metallurgical and Materials Transactions B. 1999; 30:189–195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/S11663-999-0047-0>

References

1. Tanushree Dutta, Ki-Hyun Kim, Minori Uchimiya, Eilhann E Kwon. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*. 2016; 150(26):182-190. (In Eng.) doi: 10.1016/j.envres.2016.05.052.
2. Ross K Taggart, James C Hower, Gary S Dwyer, Heileen Hsu-Kim. Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.- Based Coal Combustion Fly Ashes. *Environmental science and Technology*. 2016; 50(11). (In Eng.) doi: 10.1021/acs.est.6b00085.
3. Ata Akcil, Ceren Erust, Chandra Sekhar Gahan, Mehmet Ozgun. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants – a review. *Waste Management*. 2015; 45(Urban Mining):258-271. (In Eng.) doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.017.
4. Ariuntuya Battsengel, Altansukh Batnasan, Ariunbolor Narankhuu, Kazutoshi Haga. Recovery of light and heavy rare earth elements from apatite ore using sulphuric acid leaching, solvent extraction and precipitation. *Hydrometallurgy*. 2018; 179. (In Eng.) doi: 10.1016/j.hydromet.2018.05.024.
5. Rare Earths Statistics and Information [Electronic resource] // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey: [Website]. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения: 01.10.2025).
6. U.S. Geological Survey, 2023, Mineral commodity summaries 2023: U.S. Geological Survey, 210 p. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017.
7. Nabeel Mancheri, Benjamin Sprecher, Gwendolyn Bailey, Jianping GE. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources Conservation and Recycling*. 2018; 142 (march 2019):101-112. (In Eng.) doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017
8. K. O. Belousova, N. A. Zolotukhina, and Yu. A. Vinidiktova. "Selection of Optimal Conditions for the Extraction of Lanthanum from Waste at the JSC Tsof" Berezovskaya." *Collection of Materials from the 1st International conference "Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects"*, KuzGTU, 2024, pp. 1-7.
9. Adam Jordens, Ying Ping Cheng, Kristian Edmund Waters. A review of the benefit of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*. 2013; 41:97–114. (In Eng.) doi: 10.1016/j.mineng.2012.10.017
10. K.O. Belousova, A.A. Maltseva Problems of Coal Processing Waste and Their Solutions II All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Schoolchildren "Ecology and Life Safety". KuzGTU, 2024, pp. 1-5.
11. Abdrakhimov, V. Z., et al. Research by the regression method of the analysis of the influence of slag from smelting ferroalloys on the physical and mechanical indicators of ceramic bricks. *Expert: Teoriya i Praktika*, no. 6, 2020, pp. 48-59.

12. Mikhailov, V. G., and A. A. Khoreshok. "Improving the Mechanisms of Ensuring Geoecological Safety in the Field of Waste Management." *Izvestiya Tulgu. Earth Sciences*, no. 3, 2022, pp. 40-54.

13. T.G. Cherkasova, N.A. Zolotukhina, D.A. Barantsev, et al. Percolation leaching of granules of Berezovskaya JSC Central Mining and Processing Plant with 0.05 M sulfuric acid solution. *Coal*. 2024;(8):71-75. doi: 10.18796 / 0041-5790-2024-8-71-75.

14. Chi R., Xu Z. A solution chemistry approach to the study of rare earth element precipitation by oxalic acid. *Metallurgical and materials Transactions B*. 1999; 30:189–195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/S11663-999-0047-0>